**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
З УРАХУВАННЯМ ВИСОКОГО НАСИЧЕННЯ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ****В. В. Ченчевой, О. О. Ченчева, Ю. В. Зачепа, Р. П. Яцюк, В. І. Куцевол, А. В. Некрасов, М. Г. Федь**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vladchen.86@gmail.com

У статті представлений аналіз усталеного стану асинхронного генератора, що самозбуджується, на основі математичної моделі в трифазній системі координат, що дозволяє врахувати вплив фізичних явищ, таких як нелінійність кривої намагнічування, явища гістерезису і вихрових струмів, на динамічні характеристики асинхронного генератора. До переваг моделі слід віднести можливість дослідження спектрального складу вихідної напруги і струму при різних ступенях насичення магнітної системи. В роботі моделюються і оцінюються вплив величини навантаження, що підключається, на якість вихідної напруги генератора. Алгоритм швидкого перетворення Фур'є використовується для аналізу гармонійних складових напруги і струму асинхронного генератора в сталому режимі. Проаналізовано зміну коефіцієнта гармонік і його відповідність до гранично-допустимих значень. Отримано результати експериментальних досліджень асинхронного генератора в автономному режимі роботи і проведено оцінку адекватності запропонованої математичної моделі.

Ключові слова: асинхронний генератор, високе насичення, гармонійні складові.**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С УЧЕТОМ ВЫСОКОГО
НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ****В. В. Ченчевой, О. А. Ченчева, Ю. В. Зачепа, Р. П. Яцюк, В. И. Куцевол, А. В. Некрасов, М. Г. Федь**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vladchen.86@gmail.com

В статье представлен анализ установившегося состояния самовозбуждающегося асинхронного генератора на основе математической модели в трехфазной системе координат, позволяющая учесть влияние физических явлений, таких как нелинейность кривой намагничивания, явления гистерезиса и вихревых токов, на динамические характеристики асинхронного генератора. К достоинствам модели следует отнести возможность исследования спектрального состава выходного напряжения и тока при различных степенях насыщения магнитной системы. В работе моделируются и оцениваются влияние величины подключаемой нагрузки на качество выходного напряжения генератора. Алгоритм быстрого преобразования Фурье используется для анализа гармонических составляющих напряжения и тока асинхронного генератора в установившемся режиме. Проанализировано изменение коэффициента гармоник и его соответствие гранично-допустимым значениям. Получены результаты экспериментальных исследований асинхронного генератора в автономном режиме работы и проведена оценка адекватности предложенной математической модели.

Ключевые слова: асинхронный генератор, высокое насыщение, гармонические составляющие.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В останні роки посилюється тенденція до використання асинхронних генераторів (АГ) з конденсаторним збудженням в якості автономного джерела живлення [1–7]. До переваг АГ можна віднести простоту конструкції і технічного обслуговування, найкращу експлуатаційну надійність, відсутність щітково-колекторного вузла.

Однією з особливостей АГ є те, що зі збільшенням коефіцієнта насичення магнітопроводу збільшується його перевантажувальна здатність і жорсткість зовнішніх характеристик. Однак, слід мати на увазі, що з ростом насичення магнітопроводу погіршуються параметри генерованої електроенергії. Наявність вищих гармонійних складових напруги і струму АГ з короткозамкнутою обмоткою ротора обумовлена несинусоїдальним розподілом магніторушійної сили (МРС) в повітряному зазорі машини [8] внаслідок конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів.

Таким чином, коефіцієнт насичення магнітопроводу повинен обиратися також з

урахуванням вимог споживача щодо параметрів електроенергії. При цьому необхідно якомога точніше вимірювати струм статора з урахуванням гармонійних складових, оскільки тривала робота генератора з перевантаженням значно скорочує термін експлуатації [9]. Крім цього наявність вищих гармонійних складових в ланцюзі АГ призводить до незатухаючих коливальних процесів як моменту на валу, так і частоти обертання ротора, а також до вібрації асинхронної машини.

Незважаючи на значне число публікацій, пов'язаних з вивченням перехідних процесів в АГ, до кінця не було виявлено багато явищ і не отримано кількісних значень миттєвих струмів і напруг при різних ступенях насичення магнітної системи.

Однією з основних причин є відсутність математичних моделей, що враховують особливості фізичних процесів, які відбуваються в асинхронній машині при високому насиченні магнітної системи, зокрема значне зростання втрат у сталі. Існуючі роботи [10, 11], присвячені дослідженню гармонійних складових напруги і струму,

торкаються лише невисокого ступеню насичення магнітної системи.

Мета роботи – розробка математичної моделі перехідних процесів для детального дослідження гармонійних складових напруги та струму АГ у складі автономних генераторних установок при високому насиченні магнітної системи.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для отримання перехідних характеристик за основу було обрано математичну модель АГ в трифазній системі координат, яка, в порівнянні з ортогональними моделями, найбільш повно відображає фізичні процеси, що протікають в електричній машині, і крім цього, дозволяє досліджувати несиметричні режими роботи генератора [12–14].

Рівняння балансу напруг для трифазної асинхронної машини (АМ) представлено системою:

$$\begin{aligned} d\Psi_A / dt &= U_A - i_A r_s; \quad d\Psi_B / dt = U_B - i_B r_s; \\ d\Psi_C / dt &= U_C - i_C r_s; \\ 0 &= i_A r_r + d\Psi_A / dt; \quad 0 = i_B r_r + d\Psi_B / dt; \\ 0 &= i_C r_r + d\Psi_C / dt, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\Psi_{A,B,C}$ і $\Psi_{a,b,c}$ – повне потокозчеплення фази статора і ротора, відповідно; $i_{A,B,C}$ і $i_{a,b,c}$ – струм в фазі статора і ротора, відповідно; $r_{A,B,C}$ і $r_{a,b,c}$ – опір фази статора і ротора, відповідно; $U_{A,B,C}$ – значення напруги на фазах статора.

У свою чергу потокозчеплення будь-якої фази визначається значеннями власної індуктивності і взаємної індуктивності з іншими обмотками електричної машини (ЕМ):

$$\begin{cases} \Psi_A = (L_{s\sigma} + 2L_1 / 3) i_A + 2L_1 \cos(\rho) i_B / 3 + \\ \quad + 2L_1 \cos(2\rho) i_C / 3 + M i_a \cos \gamma + \\ \quad + M i_b \cos(\gamma + \rho) + M i_c \cos(\gamma - \rho); \\ \Psi_a = (L_{r\sigma} + 2L_2 / 3) i_a + 2L_2 \cos(\rho) i_b / 3 + \\ \quad + 2L_2 \cos(\rho) i_c / 3 + M i_A \cos \gamma + \\ \quad + M i_B \cos(\gamma - \rho) + M i_C \cos(\gamma + \rho), \end{cases} \quad (2)$$

де $L_1 = L_2 = M = L_\mu$ – максимальне значення взаємної індуктивності, при збігу осей відповідних обмоток фаз статора "А" і ротора "а"; $L_{s\sigma}$ і $L_{r\sigma}$ – індуктивності розсіювання фази статора і ротора, відповідно; $\rho = 2\pi/3$.

З урахуванням умови симетрії обмоток двигуна і умови симетрії струмів статора і ротора ($i_A + i_B + i_C = 0$; $i_a + i_b + i_c = 0$) Система рівнянь (2) набуде вигляду:

$$\begin{cases} \Psi_A = (L_{s\sigma} + L_1) i_A + M i_a \cos \gamma + \\ \quad + M i_b \cos(\gamma + \rho) + M i_c \cos(\gamma - \rho); \\ \Psi_a = (L_{r\sigma} + L_2) i_a + M i_A \cos \gamma + \\ \quad + M i_B \cos(\gamma - \rho) + M i_C \cos(\gamma + \rho). \end{cases} \quad (3)$$

Електромагнітний момент АМ визначається як похідна накопиченої електромагнітної енергії W_e машини по куту γ повороту ротора:

$$T_e = p \cdot dW_e / d\gamma. \quad (4)$$

Електромагнітна енергія розраховується як:

$$W_e = 0,5 (\Psi_A i_A + \Psi_B i_B + \dots + \Psi_b i_b + \Psi_c i_c). \quad (5)$$

Рівняння швидкості обертання ротора представимо у вигляді:

$$d\omega_r / dt = (T_e - T_{meh}) / J, \quad (6)$$

де J – момент інерції ротора; T_{meh} – механічний момент на валу ЕМ.

Однак, як показано в роботі [9], отримання достовірної інформації про гармонійний склад струму і напруги в асинхронній машині є неможливим без урахування впливу нелінійності кривої намагнічування, гістерезису і вихрових струмів.

Для АГ насичення намагнічуваної індуктивності є основним фактором накопичення і стабілізації напруги, яка генерується. Отже, врахування індуктивності намагнічування L_μ , що змінюється зі струмом намагнічування i_μ в моделі автономного АГ є обов'язковим. Адекватність математичної моделі генератора буде залежати від точності опису кривої намагнічування.

Нелінійна залежність індуктивності від струму може бути представлена різного роду апроксимаційними кривими. Залежно від поставленої мети, необхідної точності досліджень і безпосередньо складності опису тієї чи іншої нелінійної залежності можуть бути застосовані різні види апроксимації – чи то ступеневим або тригонометричним поліномом, чи то кусково-лінійною апроксимацією тощо.

Залежність індуктивності гілки намагнічування від струму намагнічування $L_\mu(i_\mu)$, отримана на основі характеристики холостого ходу, представлена ступеневим поліномом виду:

$$L_\mu(i_\mu) = a_1 + 3a_3 i_\mu^2 + 5a_5 i_\mu^4 + \dots + (2n+1)a_{2n+1} i_\mu^{2n}, \quad (7)$$

де $a_1, a_3, \dots, a_{2n+1} i_\mu^{2n}$ – коефіцієнти апроксимації.

Слід додати важливе зауваження, яке стосується того, що в існуючих моделях АГ не враховується факт відставання потоку (індуктивності) від струму намагнічування внаслідок властивостей доменної структури феромагнетиків при змінному в часі

намагнічуванні [15, 16].

Цю властивість можна врахувати шляхом відповідного кута зсуву кожної з гармонік струму намагнічування, які входять в періодичну залежність $i_\mu(t)$. Тоді вираз для індуктивності в часі отримаємо шляхом підстановки у вираз $L_\mu(i)$ скоригованої залежно від фазового кута в сторону випередження гармонік струму намагнічування.

По суті це означає, що для врахування запізнювання в процесі формування потоку можна представити струм намагнічування тоді випереджаючим:

$$\dot{L}_\mu(t) = a_1 + 3a_3 i_\mu^2(t) + \dots + (2n+1)a_{2n+1} i_\mu^{2n}(t). \quad (8)$$

При цьому вважаємо, що

$$i_\mu(t) = \sum_{m=1}^{m=\infty} I_m \cos(m\Omega t + \varphi_m), \text{ в той час як}$$

$$\dot{i}_\mu(t) = \sum_{m=1}^{m=\infty} I_m \cos(m\Omega t + \varphi_m - \delta_m). \quad (9)$$

де m – номер гармоніки струму намагнічування при розкладанні його в тригонометричний ряд; φ_m – фазовий зсув гармоніки, що отримується при формуванні тригонометричного ряду; δ_m – кут фазової корекції для врахування запізнювання процесу формування потоку при змінному перемагнічуванні.

На рис. 1 приведена структурна схема однієї фази статора АГ, де враховується кут магнітного запізнення.

Рисунок 1 – Структурна схема фази статора АГ з урахуванням кута магнітного запізнення

На рис. 1 прийняті наступні позначення: $U_A(t)$ – напруга фази «А» статора АД; $i_A(t)$ – струм фази «А» статора АД; i_a, i_b, i_c – струми фаз ротора, відповідно; δ – кут магнітних втрат, що дозволяє врахувати запізнювання процесу зміни магнітного потоку при змінному перемагнічуванні; γ – кут повороту ротора; p – оператор Лапласа.

Решта фаз АГ моделюються аналогічно. При цьому в роботі [15] показано, що кут магнітного запізнення дозволяє врахувати не тільки явище гістерезису, а й вплив вихрових струмів і пульсацій магнітного поля.

Проведено дослідження роботи АГ номінальною потужністю 1,5 кВт зі збудженням від конденсаторних батарей ємністю 70 мкФ. На рис. 2 наведені отримані динамічні петлі гістерезису, розширення яких на кінцях пов'язано з інерційними явищами при русі доменних структур [15].

Рисунок 2 – Розрахункові петлі гістерезису при самозбудженні автономного АГ

На рис. 3 і 4 представлені форми і спектральні аналізи гармонійного складу струму та напруги статора АГ. Оцінювання гармонійного складу вихідної напруги і струму статора АГ виконано за методикою [16], на підставі аналізу коефіцієнта гармонік – Total Harmonic Distortion (THD).

Рисунок 3 – Сигнал а) і спектрограма б) струму статора АГ при ступені насичення магнітної системи $k_\mu = 1,4$

Зі спектрограм струму статора видно, що крім першої (основної) гармоніки в гармонійному складі присутні вищі гармоніки: 3-тя, 5-а, 7-а (тобто 150, 250 і 350 Гц відповідно), амплітуди яких, з ростом номера гармоніки зменшуються. При цьому коефіцієнт THD становить 10,2 %. Відсутність парних гармонік, а також гармонік кратних трьом пояснюється тим, що АГ є симетричною ЕМ, включеною за схемою "зірка".

Рисунок 4 – Сигнал а) і спектрограма б) вихідної напруги АГ при ступені насичення магнітної системи $k_\mu = 1,4$

В кривій напруги присутні гармонійні складові, зокрема, це 3-тя і 5-а гармоніки. У деяких випадках присутні 2-а, 4-а, 6-а і 7-а гармоніки, які у відсотковому відношенні до основної гармоніки не перевищують 1 %.

Зі збільшенням ступеню насичення, амплітуди перерахованих вищих гармонік збільшуються, що призводить до збільшення коефіцієнта THD (рис. 5).

Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта THD від ступеня насичення магнітної системи

THD кількісно характеризує наявність вищих гармонік у вихідній напрузі генератора. Представлені на графіках форма і спектр вищих гармонік вихідної напруги і струму статора АГ очевидно показують значну присутність «заважаючих частот». Стандарти допускають величину клірфактору не більше 15 %, що нерідко спостерігається в синхронних генераторах.

На рис. 6 наведені зовнішні характеристики АГ для різних значень коефіцієнта насичення магнітопроводу. Зміна значення коефіцієнта насичення досягалася шляхом зміни значень ємностей збуджуючих конденсаторів. Для порівняння характеристики представлені у відносних одиницях.

Рисунок 6 – Зовнішні характеристики АГ для активного навантаження при різних ступенях насичення магнітної системи

Виходячи з рис. 5 і 6, максимальна допустима перевантажувальна здатність АГ з урахуванням забезпечення необхідної якості вихідної напруги становить 50–70 % від потужності генератора. Для коефіцієнта насичення $k_\mu = 2,5$, максимальна перевантажувальна здатність складає 0,7, що при допущенні $\text{THD} \leq 15\%$ дозволяє використовувати генератор для споживачів, для яких погіршення параметрів електроенергії не є обмеженням в застосуванні АГ (освітлювальні та вентиляційні системи, системи подачі і підігріву води, зварювальні станції).

У випадку споживачів, вимогливих до якості питомої напруги (асинхронні та синхронні двигуни), максимальна потужність навантаження не повинна перевищувати 50 % потужності генератора.

Для перевірки адекватності описаної вище моделі було проведено експериментальні дослідження.

Експериментальні дослідження проводилися для АГ на базі асинхронного двигуна з наступними каталоговими даними: номінальна потужність $P_n = 1,5$ кВт; номінальна напруга $U_n = 220$ В; номінальний струм $I_n = 4,4$ А; активний опір статора $R_1 = 5,51$ Ом; індуктивність статора $L_1 = 0,1445$ Гн; індуктивність ланцюга намагнічування $L_\mu = 0,1235$ Гн; активний опір ротора $R_2 = 2,24$ Ом; індуктивність ротора $L_2 = 0,1445$ Гн.

Експериментальні дослідження велися на комп'ютеризованому лабораторному комплексі (рис. 7), що дозволяє здійснювати повномасштабні дослідження якісних і кількісних характеристик АГ.

Рисунок 7 – Випробувальний стенд для визначення характеристик АГ

Якщо врахувати, що точність вимірювання параметрів АГ не перевищувала 5–10 %, то дані дослідження підтверджують високу ступінь адекватності математичної моделі реальній установці.

Перехідні характеристики струму статора $i(t)$ і вихідної напруги $U(t)$ зображені на рис. 8 для схеми з'єднання «зірка».

Адекватність отриманих результатів визначалася за результатами порівняння експериментальних і розрахункових кривих струму статора. Ступінь збігу оцінювалася за коефіцієнтом детермінації R^2 , який дорівнює 0,992.

Результати гармонійного аналізу сигналів напруги та струму статора АГ при роботі на холостому ході наведені в табл. 1.

Як видно з таблиці, відмінності значень гармонік вихідної напруги і струму статора АГ, отримані на випробувальному стенді і на математичній моделі, побудованій з урахуванням фізичних процесів при високому насиченні магнітної системи, знайдені як середньоквадратична похибка і становлять менше 5 %.

Рисунок 8 – Миттєві значення вихідної напруги і струму статора АГ.

Таблиця 1 – Розподіл гармонійних складових напруги і струму

	Гармонійні складові, %					
	Напруга			Струм		
	Номер гармоніки					
	3	5	7	3	5	7
Математична модель	3,777	0,939	0,113	11,39	4,685	0,841
Випробувальний стенд	3,656	0,892	0,113	10,81	4,454	0,712

ВИСНОВКИ. Математична модель, розроблена з урахуванням фізичних процесів при високому насиченні магнітної системи, забезпечує високу ступінь адекватності в порівнянні зі стандартними моделями автономного АГ з конденсаторним збудженням. Максимальна похибка розбіжності деяких параметрів перехідних процесів становить до 6 %. Розбіжність пов'язана зі зміною теплового стану асинхронної машини і зміною внаслідок цього її параметрів.

Коефіцієнт гармонік кривої вихідної напруги АГ при високому насиченні магнітної системи перевищує гранично допустиме значення 15 % і обмежує його застосування у складі автономних джерел електроенергії. Отже, при використанні АГ в якості джерела електроенергії для досягнення високої переважувальної здатності доцільно

перетворювати його вихідну напругу в постійну, а потім в змінну необхідної частоти. Також можливим і доцільним є застосування смугових фільтрів, що обмежують пропускання сигналів певної частоти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Торопцев Н. Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. Москва : НТФ «Энергопресс», 2004. 87 с.
2. Кицис С. И. Асинхронные самовозбуждающиеся генераторы. Москва : Энергоатомиздат, 2003. 328 с.
3. Нетушил А. В., Листвин В. С. Автономный асинхронный генератор как нелинейная автоколебательная система. *Изв. вузов. Электромеханика*. 1977. № 5. С. 500–505.

4. Кашкалов В. И. Конденсаторное торможение асинхронных двигателей. Москва : Энергия, 1977. 121 с.

5. Нетушил А. В. К расчету режимов самовозбуждения асинхронного генератора. *Электричество*. 1978. № 4. С. 51–53.

6. Алиев И. И., Беспалов В. Я., Чернов Р. О. Переходные режимы асинхронного генератора с гарантированным самовозбуждением при симметричной нагрузке. *Электротехника*. 1999. № 9. С. 53–55.

7. Кашкалов В. И., Долгополов Ф. К. Торможение асинхронных двигателей без внешнего источника энергии. Москва : Техника, 1985. 119 с.

8. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. Питер – Москва, 2010. 352 с.

9. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. Москва : Энергия, 1981. 352 с.

10. Васько П. Ф., Головкин В. М., Вербовий А. П. Вищі гармонічні складові напруги та струму асинхронного генератора з короткозамкнутою обмоткою ротора у складі малих вітро- та гідроелектричних установок. *Відновлювана енергетика*. 2016. № 4 (47). С.63–67.

11. Schostan S., Dettmann K. D., Do Thanh T., Schulz D. Harmonic Propagation in a Doubly Fed

Induction Generator of a Wind Energy Converter. *IEEE Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE 2009)*, 2009. P. 101–108. ISSN 2166-9546.

12. Zagirnyak M., Chornyi O., Zachepa I., Chenchvoi V. The autonomous sources of energy supply for the liquidation of technogenic accidents. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019. Vol. 95. No. 5. P. 47–50.

13. Chenchvoi V., Zachepa I., Chornyi O., Zachepa N., Ogar V., Shokarov D. The formed autonomous source for power supply of single-phase consumers on the basis of the three-phase asynchronous generator. *Proceedings of the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2018. P. 110–115.

14. Zagirnyak M., Zachepa Yu., Chenchvoi V. Estimation of induction generator overload capacity under connected direct current consumers. *Acta Technica*. Praga : Institute of Thermomechanics AS CR, 2014. Vol. 59. No. 2. P. 149–169. ISSN 0001–7043.

15. Zagirnyak M., Prus V., Rodkin D., Zachepa I., Chenchvoi V. A refined method for the calculation of steel losses at alternating current. *Archives of electrical engineering*. 2019. Vol. 68. No. 2. P. 295–308.

16. Zagirnyak M., Ogar V., Chenchvoi V. Analysis of induction motors features taking into account change of iron properties. *Acta Technica*. 2014. Vol. 59. No. 1. P. 25–47.

MATHEMATICAL MODEL OF AN INDUCTION GENERATOR TAKING INTO ACCOUNT HIGH SATURATION OF THE MAGNETIC SYSTEM

V. Chenchvoi, O. Chenchva, Iu. Zachepa, R. Yatsiuk, V. Kutsevol, A. Nekrasov, M. Fed

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vladchen.86@gmail.com

Purpose. Development of a mathematical model of transition processes for a detailed study of the harmonic components of the voltage and current of the IG as part of autonomous generator sets at high saturation of the magnetic system. **Result.** The article presents an analysis of the steady-state mode of a self-excited induction generator based on a mathematical model in a three-phase coordinate system, which makes it possible to take into account the influence on the dynamic characteristics of an asynchronous generator of such physical phenomena as the nonlinearity of the magnetization curve, the phenomenon of hysteresis and eddy currents. The article simulates and evaluates the influence of the value of the connected load on the quality of the generator output voltage. The Fast Fourier transform algorithm is used to analyze the harmonic components of the voltage and current of an induction generator in a steady state. The change in the harmonic coefficient and its compliance with the boundary permissible values are analyzed. The results of experimental studies of an asynchronous generator in an autonomous mode of operation were obtained, and the adequacy of the proposed mathematical model was assessed. **Practical value.** The carried out theoretical studies of the capacitive self-excitation of IM machines have created a good basis for solving issues related to the practical use of autonomous sources based on an asynchronous generator. Figures 8, tables 1, references 16.

Key words: induction generator, autonomous power supply, self-excitation process, self-excitation time, regression analysis.

REFERENCES

1. Toroptsev, N. D. (2004). *Asinkhronnyye generatory dlya avtonomnykh energeticheskikh ustanovok [Asynchronous generators for autonomous power installations]*. Moscow: NTF “Energoprogress”. [in Russian]

2. Kitsis, S. I. (2003). *Asinkhronnyye samovozbuzhdayushchiyesya generatory [Self-excited asynchronous generator]*. Moscow: NTF “Energoatomizdat”. [in Russian].

3. Netushil, A. V., & Listvin B. C. (1977). Avtonomnyy asinkhronnyy generator kak nelineynaya avtokolebatel’naya sistema [Autonomous asynchronous generator as a nonlinear self-oscillating system]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika*, 5. 500–505. (in Russian)

4. Kashkalov, V. I. (1977). Kondensatornoye tormozheniye asinkhronnykh dvigateley [Capacitor braking of asynchronous motors], Moscow: Energiya. (in Russian)

5. Netushil, A. V. (1978). K raschetu rezhimov samovozbuzhdeniya asinkhronnogo generator. *Elektrichestvo*, 4, 51–53. (in Russian)
6. Aliyev, I. I., Bespalov, V. YA., & Chernov, P. O. (1999). Perekhodnyye rezhimy asinkhronnogo generatora s garantirovannym samovozbuzhdeniyem pri simmetrichnoy nagruzke. *Elektrotehnika*, 9, 53–55. (in Russian)
7. Kashkalov, V. I., & Dolgoplov, F. K. (1985). *Tormozheniye asinkhronnykh dvigateley bez vneshnego istochnika energii* [Braking of asynchronous motors without an external source of energy]. Moscow: Tekhnika. (in Russian)
8. Voldek, A.I., & Popov, V.V. (2010). Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka [*Electric Machines. AC machines*], Piter: Moscow. [in Russian]
9. Geller, B., & Gamata, V. (1981). Vysshieye garmoniki v asinkhronnykh mashinakh [Higher harmonics in induction machines]. Moscow: Energiya. [in Russian].
10. Vasko, P. F., Holovko, V. M., & Verbovyi, A. P. (2016). The high harmonic components of voltage and current of the asynchronous generator with short-circuited rotor winding in small wind and hydroelectric installations, Vidnovliuvana enerhetyka. *Renewable energy*, 4, 47, 63–67. (in Russian).
11. Schostan, K. D. Dettmann, T. Do Thanh, & D. Schulz (2016). Harmonic Propagation in a Doubly Fed Induction Generator of a Wind Energy Converter, *IEEE Conference on Compatibility and Power Electronics* (CPE 2009), 101–108.
12. Zagirnyak, M., Chornyi, O., Zachepa, I., & Chenchvoi, V. (2019). The autonomous sources of energy supply for the liquidation of technogenic accidents, *Przeglad Elektrotechniczny*, 95, 5, 47–50.
13. Chenchvoi, V., Zachepa, I., Chornyi, O., Zachepa, N., Ogar, V., & Shokarov, D. (2018). The formed autonomous source for power supply of single-phase consumers on the basis of the three-phase asynchronous generator, *Proceedings of the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 110–115.
14. Zagirnyak, M., Zachepa, Yu., & Chenchvoi, V. (2014). Estimation of induction generator overload capacity under connected direct current consumers, *Acta Technica*, Praga: Institute of Thermomechanics AS CR, 59, 2, 149–169, ISSN 0001–7043.
15. Zagirnyak, M., Prus V., Rodkin, D., Zachepa, I. & Chenchvoi, V. (2019). A refined method for the calculation of steel losses at alternating current, *Archives of electrical engineering*, 68, 2, 295–308.
16. Zagirnyak, M., Ogar, V., & Chenchvoi, V. (2014). Analysis of induction motors features taking into account change of iron properties, *Acta Technica*, 59, 1, 25–47.

Стаття надійшла 11.02.2021.